带时间窗的多目标蔬菜运输配送路径优化算法

王　芳[1]，滕桂法[1,2*]，姚竟发[3]

（1. 河北农业大学 信息科学与技术学院，河北保定 071001；2. 河北省农业大数据重点实验室，河北保定 071001；3. 河北软件职业技术学院，河北保定 071030）

摘　要：为了解决蔬菜运输耗时长、成本高、保鲜时间短，导致送达到客户手上蔬菜质量降低等问题，在考虑了车辆载重和时间窗等约束条件下，本研究提出了一种带时间窗多目标蔬菜配送路径优化的遗传-模拟退火（Genetic Algorithm and Simulated Annealing，GA-SA）算法。在遗传算法（Genetic Algorithm，GA）操作过程中引入模拟退火（Simulated Annealing，SA）算法自适应（Metropolis）接受准则：首先将原始种群进行遗传算法的选择、交叉、变异等操作，形成新一代路径种群，此时通过引入Metropolis准则，对新一代路径种群分布情况进行修正、选择、交叉、变异，得到目标路径种群，达到全部车辆配送完返回到配送中心的耗时最少、成本最低、车辆使用最少的多目标，求得蔬菜运输的最优路径。设计以保定市为配送中心以及向保定市下辖的各个乡镇为配送点进行蔬菜运输路径优化的试验，结果证明，与传统的GA、SA相比，GA-SA能够有效增快其收敛速度，优化后的配送路线总成本分别降低了约23.7%和4%，总路程分别减少了22.6%和3%，耗时分别减少了26.2和2.6 h，车辆分别少使用2辆和1辆。本研究可为冷鲜食品以及其他运输路径优化研究提供参考价值。

关键词：遗传算法；Metropolis准则；车辆路径问题；蔬菜运输；SA算法；耗时；成本；路径优化

中图分类号：S24　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**202109-SA010

引用格式：王芳，滕桂法，姚竟发．带时间窗的多目标蔬菜运输配送路径优化算法[J]. 智慧农业(中英文), 2021, 3(3): 152-161.

WANG Fang, TENG Guifa, YAO Jingfa. Multi-objective vegetable transportation and distribution path optimization with time windows[J]. Smart Agriculture, 2021, 3(3): 152-161. (in Chinese with English abstract)

1　引　言

近年来，随着人们对新鲜蔬菜的需求日益增长，中国设施蔬菜生产发展迅速，已成为世界设施蔬菜种植第一大国[1]。但蔬菜是易腐烂食物，对运输时间和运输环境[2]都有较高的要求，需要在冷藏状态以最短的时间运送到客户手上，因此运送路径规划问题模型变得更加复杂，是典型的非确定性多项式（Non-Deterministic Polynomial，NP）问题[3-5]。如何在一定的约束条件下达到成本最低、耗时最短等目的，成为研究者重视的研究内容。Wang和Wasil[3]对近五十年来关于研究车辆路径问题进行了总结，从精确方法和启发法两种方法解决周期性车辆路径问题（Vehicle Routing Problem，VRP）和圆弧布线问题（Arc Routing Problem，ARP）两种问题进行分析，但是只考虑了常见方法。周洋和陆轶[6]对A

收稿日期：2021-08-24　修订日期：2021-09-19

基金项目：河北省重点研发计划项目（21327405D）

作者简介：王　芳（1995—），女，硕士研究生，研究方向为农业大数据技术。E-mail：1540242939@qq.com。

*通讯作者：滕桂法（1963—），男，教授，研究方向为农业大数据技术。电话：18603126628。E-mail：tguifa@hebau.edu.cn。

蔬菜运输公司物流配送路径进行了优化研究，采用节约里程法对其进行优化，以总路程和配送成本为目标，但这是同一种货物进行配送，没有考虑物流配送中的各种相关成本。陶涛和朱家明[7]提出了一种基于Floyd算法对蔬菜运输路径进行优化，达到了效率最大化，对实际生活提供了一定的参考价值。苏贝贝[8]根据应急物资配送过程中遇到的公共问题以及自然灾害设计了路径规划干扰管理模型，并使用耦合Dijstra算法进行求解。Mendes等[9]提出了一种在线降维方法来处理有需求响应运输的车辆路径问题。Lespay和Suchan[10]针对具有时间窗的一致车辆路径问题开发了启发式算法。Molina等[11]针对具有时间窗的异构车辆路径问题，提出了一种基于蚁群系统（Ant Colony System，ACS）的模因算法。赵邦磊[12]改进多目标蚁群算法对冷链物流路径优化进行研究，但只是对目标进行优化，在收敛速度上尚未改进。

上述研究大多针对单目标的路径优化[13-15]，并且在收敛速度上改进较少[16]，选择的是少量客户形成的小数据集[17-20]。蔬菜运输既不同于其他的没有时间窗的物流运输，也不同于软时间窗[21-24]的冷链运输，不同的蔬菜有不同的保鲜度，而客户又需要不同种类的蔬菜。为使蔬菜能在保鲜时间内送达客户，且达到配送成本最低、耗时最短、使用车辆最少的目标，本研究采用三种算法进行求解。考虑多种因素，采用97个配送地点和1个配送中心[25]，形成98×98矩阵的数据集进行仿真，建立耗时最少、成本最低、车辆使用最少的多目标模型。并针对保定市以及周边乡镇进行蔬菜配送[26]进行路径规划仿真实验，为其他类似路径规划[27]提供参考价值。

2　蔬菜运输配送模型

车辆路线问题（Vehicle Routing Problem，VRP）最早是由Dantzig和Ramser于1959年首次提出[28]，一般描述为一定数量的客户，各自有不同数量的货物需求，配送中心向客户提供货物，由一个车队负责分送货物，组织适当的行车路线[29]，目标是使得客户的需求得到满足，并能在一定的约束下，达到路程最短、成本最小、耗费时间最少等目的。

构建蔬菜配送路径规划模型满足以下约束条件：

（1）所有运输蔬菜车辆从配送中心出发，最后回到配送中心；

（2）每个客户被一辆车服务，每辆车走一条路线；

（3）每条运输线路上，客户需求量不能超过车辆载重总和；

（4）每条配送路径的长度不超过配送车辆一次配送的最大行驶距离；

（5）车辆不能有重复的路线；

（6）在客户需要蔬菜的最短保鲜时间内送达。

本研究的蔬菜运输路径规划问题可以描述为：多辆车在同一个配送中心出发，分别向多个配送地点运输，每辆车的运载能力一定，每个配送点的需求量不能超过每辆车的运载能力，使用同一类型的货车，每辆车的保鲜设置和封闭性都达到相同状态，配送中心有足够的车辆被调用，并且配送结束之后返回配送中心，根据以上描述来求以成本使用最低、时间消耗最短、车辆使用最少为目标的最佳路径。本研究的案例配送地点如图1所示，其中黑色圆点代表配送地点，三角代表配送中心。

根据蔬菜配送地点和配送中心创建数学模型，需要做出以下定义：共有N个配送点，配送车辆的编号为c（c=1，2，…，n），客户需求量的编号为g_i（i=1，2，…，n），客户的编码为i（i=1，2，…，n），车载容量为h，可需车辆数量最多A辆。因此建立以下数学模型。

目标1：成本消耗最少，即车辆运输成本和车辆固定使用成本的总和最少。

$$\min Z_1 = \sum_{i=0}^{N}\sum_{j=0}^{N}\sum_{k=0}^{K} M_{ij}X_{ijk} \quad (1)$$

其中，Z_l表示消耗成本，元；N为配送地点

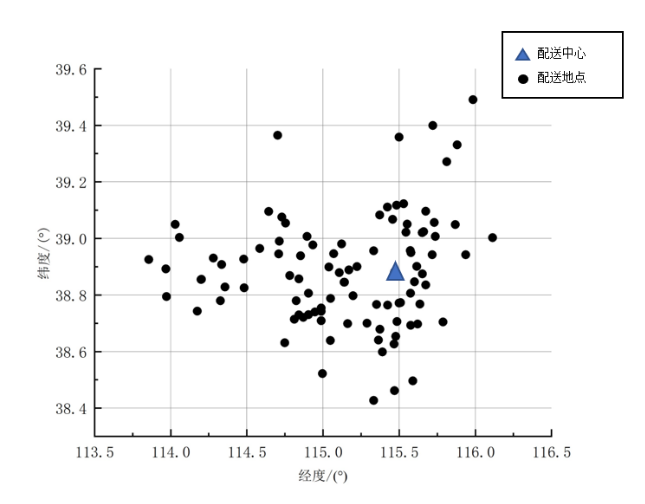


图 1　配送中心和配送地点位置点图

Fig. 1 Distribution center and distribution locations

个数，个；K为车辆数，辆；i、j为客户编码；X_{ijk}为车辆k从客户i行驶到客户j的行驶过程；M_{ij}为客户i到客户j所消耗的成本，元。

目标2：蔬菜运输消耗时间最少，即每辆车行驶的总路程除以蔬菜运输车辆的车速得到的时间（蔬菜装卸消耗的时间忽略不计），用Z_2表示，h。

$$\min Z_2 = \sum_{i=0}^{N}\sum_{j=0}^{N}\sum_{k=0}^{K} T_{ijk} \tag{2}$$

其中，T_{ijk}为车辆k从客户i行驶到客户j的耗时，h。

目标3：使用车辆最少，用Z_3表示，辆。K表示车辆数目，辆。

$$\min Z_3 = K \tag{3}$$

为了达到试验目的以及上文做出的约束条件，其约束条件公式如下：

$$\sum_{c=1}^{n}\sum_{j=0}^{n} x_{ijk} \leqslant A \tag{4}$$

$$\sum_{i=1}^{n} g_i\, y_{ic} \leqslant h \tag{5}$$

$$\sum_{i=0}^{c} x_{ijc} = y_{ic} \tag{6}$$

$$\sum_{j=0}^{c} x_{ijc} = y_{ic} \tag{7}$$

$$\sum_{i=0}^{N}\sum_{j=0}^{N}\sum_{k=0}^{K} T_{ijk} < T_{max} \tag{8}$$

$$\sum_{i=0}^{N}\sum_{j=0}^{N}\sum_{k=0}^{K} T_{ijk} > T_{min} \tag{9}$$

其中，A需求最多车辆数，辆；c为车辆编码；h为车载容量，t；g_i为客户需求量，kg。T_{max}为客户需求蔬菜的最长保鲜时间，h；T_{min}蔬菜开始运输时间，h。

在上述数学模型中，公式（4）表示所有从配送中心出发的车辆数在给客户配货的总户数不超过配送中心自有的车辆总数；公式（5）表示每条配送路线的总客户需求量不大于车辆的运载能力；公式（6）和公式（7）表示一个客户只能由一辆车进行配送；公式（8）表示蔬菜开始配送时间；公式（9）表示满足客户需求的最短时间内送达。

3　蔬菜运输配送算法设计

3.1　遗传算法

遗传算法（Genetic Algorithm，GA）属于智能仿生学算法，思想源于生物遗传学和适者生存的自然规律，是按照基因遗传学原理而实现的一种迭代过程的搜索算法[30]。本研究根据配送地点确定种群大小，之后进行GA的选择、交叉、变异等操作。

蔬菜运输配送路径优化过程总结为：

Step 1：编码。首先根据蔬菜运输配送路径优化的特点，根据编码的生成方式，将所有的配送地点自然数0、1、…、N，随机生成全排列，将K−1个0随机插入全排列中，并判断每条路径是否超载，若没有超载，为有效染色体，否则为无效染色体，染色体长度=N+K1。

Step 2：初始化群体。编码之后，随机产生1～N+K−1个个体，构成初始种群。

Step 3：适应度函数。判断需求点j的需求量g_j，kg，是否小于或等于车辆的载重量，若满足就计算相应的目标函数值。

Step 4：选择操作。遵照适应度越高，选择概率越大的原则，从路径种群中选择两个个体作为父方和母方。

Step 5：交叉操作。抽取父母双方的染色体，进行概率为P_c（交叉概率）的交叉，产生有效的子代。

Step 6：变异操作。为保留群体中个体的多样性对子代的染色体进行概率为P_m（变异概率）变异。

Step 7：重复Step3，Step4，Step5，Step6步骤，直到新种群的产生。

3.2 GA改进

SA算法来源于固体退火原理，将固体加温至充分高，再让其徐徐冷却。加温时，固体内部粒子随温升变为无序状，内能增大，而徐徐冷却时粒子渐趋有序，在每个温度都达到平衡态，最后在常温时达到基态，内能减为最小。

GA易过早收敛且效率比其他传统方法低，易陷入局部最优解，为解决这一问题，在GA的交叉变异等操作之后，引入Metropolis准则，具体操作为：将原始路径种群进行GA的选择、交叉、变异等操作后，形成新一代路径种群，此时引入自适应Metropolis准则，对新一代路径种群分情况进行修正选择交叉变异后的种群，得到目标路径种群。其中Metropolis准则常表示为以下模型。

$$P_z = \begin{cases} 1 & E(x_{after}) < E\left(x_{before}\right) \\ \exp\left(-\dfrac{E(x_{after}) - E\left(x_{before}\right)}{\mathrm{a}T}\right) & E(x_{after}) \geqslant E\left(x_{before}\right) \end{cases} \tag{10}$$

其中，P_z为差值概率；a为Boltzmann常数。

引入Metropolish准则之后判断是否保留该个体的过程如下述（1）和（2）所写。

（1）若经过选择交叉变异后种群中第v个个体的能量值（函数值）小于操作前第u个个体的能量值（函数值），则无条件保留该个体，遍历所有个体。

（2）若新个体v的能量值（函数值）大于操作前个体能量值（函数值），则根据两者状态下的差值概率公式进行选择优良个体。

$$\mathrm{P}_z = \exp\left[-\frac{\Delta E}{aT}\right] \tag{11}$$

公式（11）用来判断是否选择该个体，即若概率为Random［0，1］任意数，则选择遗传操作后的新个体v；反之则依然保持原始状态选择个体u，此为Metropolis准则。

改进后的GA路径优化问题的算法流程如下图2所示。

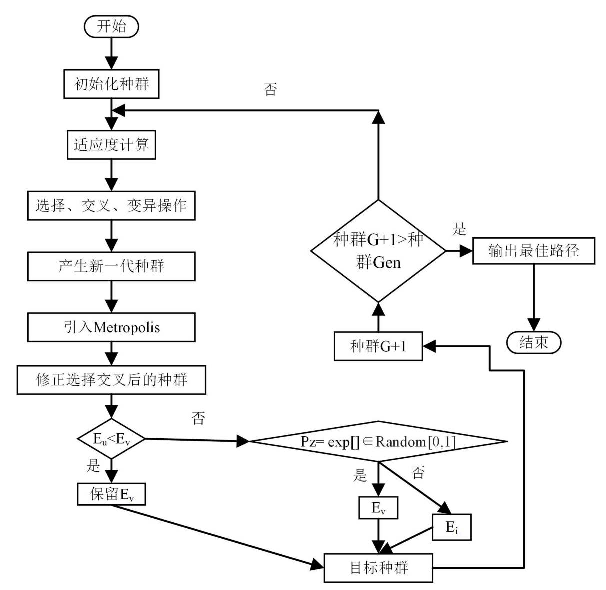


图2 遗传-模拟退火算法流程图

Fig. 2 Flow chart of genetic simulated annealing algorithm

4 试验设计与结果分析

4.1 试验数据

试验地点为河北省保定市为配送中心，保定市下辖的部分乡镇为配送地点，根据各个配送地点的实际需求、保定市盛产的蔬菜品种[31]以及每种蔬菜的易腐烂程度，把蔬菜分为以下三大类，如表1所示。

以保定市为配送中心，向保定市下辖的部分乡镇进行配送。试验包括98个地点，其中包括1个配送中心和97个配送地点，具体安排如附表所示。配送地点坐标、配送地点之间的距离等数据来自百度地图，采用人工采集的实时数据和根据实际情况确定。数据的处理与编程使用

表1　蔬菜分类及时间窗

Table 1 Vegetable classification and time widow

蔬菜种类	适宜温度/°C	集装箱温度/°C	时间窗/h	蔬菜分类
叶菜蔬菜	0	8～12	0～4	一类
茄果类蔬菜	7～8	8～12	0～4	一类
菌类蔬菜	0	8～12	0～6	二类
根茎类蔬菜	3～5	8～12	0～10	三类
瓜果类蔬菜	7～8	8～12	0～10	三类

2020aMATLAB软件完成。

确定算法参数，其中迭代次数为2000次，冷却因子为0.99，选择交换结构的概率为0.2，选择逆结构的概率为0.5，交叉概率为0.9，变异概率为0.05，代沟概率为0.9。根据实际情况确定车辆运输成本为0.5元/km，车速为40 km/h，配送车的车载容量为5 t。

4.2 试验过程

Step 1：加载原始数据，配送点之间的距离单位为km，如表2所示。

表2　蔬菜配送路径优化试验原始数据

Table 2 Original data of vegetable distribution route optimization test

地点	保定市	定州市	涿州市	…	腰山镇	蒲上乡	…	北果元乡	博野县	蠡县
保定市	0									
定州市	67.3	0								
涿州市	99.3	158.7	0							
…	…	…	…	0						
腰山镇	26.1	54.3	113.8	…	0					
蒲上乡	33.6	50.6	112.4	…	8.8	0				
…	…	…	…	…	…	…	0			
北果元乡	165.1	131.1	237,2	…	120.2	113.6	…	0		
博野县	49.1	53.7	141.1	…	100.1	95.4	…	156.9	0	
蠡县	60.3	66.5	142.9	…	91.8	87.6	…	173.6	14.8	0

Step 2：处理数据，给每一个配送地点进行编码，形成距离矩阵，单位为km，如表3所示。

表3　蔬菜配送路径优化试验处理后的数据

Table 3 Data after experimental processing of vegetable distribution route optimization

地点编码	0	1	2	…	28	29	…	95	96	97
0	0	67.3	99.3	…	26.1	33.6	…	165.1	49.1	60.3
1	67.3	0	158.7	…	54.3	50.6	…	131.1	53.7	66.5
2	99.3	158.7	0	…	113.8	112.4	…		141.1	142.9
…	…	…	…	0	…	…	…	…	…	…
28	26.1	54.3	113.8	…	0	8.8	…	120.2	100.1	91.8
29	33.6	50.6	112.4	…	8.8	0	…	113.6	95.4	87.6
…	…	…	…	…	…	…	0	…	…	…
95	165.1	131.1	237.2	…	120.2	113.6	…	0	237.2	173.6
96	49.1	53.7	141.1	…	100.1	95.4	…	156.9	0	14.8
97	60.3	66.5	142.9	…	91.8	87.6	…	173.6	14.8	0

Step 3：随机生成路径初始种群值，车辆数目为22辆，车辆行驶总距离为5798.6 km 。

Step 4：使用GA、模拟退火算法（Simulated Annealing，SA）以及遗传-模拟退火算法（Genetic Algorithm and Simulated Annealing，GA-SA）三种算法分别进行优化。

Step 5：得到配送路线图、配送方案路线图的试验图和总路程、总耗时、总成本的试验

结果。

4.3 结果分析

以蔬菜运输编码的一次运行结果为例进行说明。对算例进行了2000次迭代求解后得到了图3，即本研究算法运行的路线图。

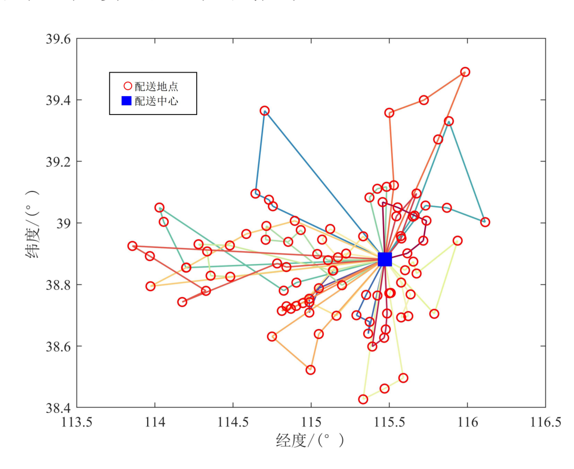


图3　蔬菜运输最优路线图

Fig. 3 Optimal roadmap for vegetable transportation

“0”表示配送中心，数字“1～97”表示配送地点，车辆使用数目为20辆，车辆行驶总距离为3564.79 km，得到了最优的20条路径，如表4所示。

4.3.1　算法试验结果分析

使用Matlab软件进行编码，分别对三种算法进行试验经过编码试验，得到的三种算法最优进化过程对比图，如图4所示。

由图4可以看出，SA收敛过程波动较大，是因为在SA算法过程中冷却速度较快，收敛过程无法稳定；GA和GA-SA的收敛速度趋势基本相同，但是最后达到的最优解不同，是因为传统的GA容易过早收敛且陷入局部最优解；GA-SA能够跳出局部最优解，之后继续训练达到最优解。GA-SA在迭代次数200次左右开始收敛，最后达到最优解2000元；GA在迭代次数300次时开始收敛达，最后到最优解2900元；SA在迭代次数1200次时开始收敛，最后达到最优解2000元。可以看出，GA-SA的收敛速度均比GA和SA快，更快的找到全局最优解，且GA-SA求得解比GA求得解更优，虽然最后SA算法能和GA-SA达到相同的解，但是在收敛过程和收敛速度中远不如GA-SA，证明了GA-SA比传统的GA和SA的性能更强。

表4　蔬菜配送路线

Table 4 Vegetable distribution routes

路线编码	规划路径地点编码
1	0—>28—>23—>31—>25—>53—>26—>0
2	0—>16—>10—>18—>5—>17—>0
3	0—>66—>35—>34—>0
4	0—>27—>89—>90—>91—>95—>86—>94—>0
5	0—>84—>87—>93—>92—>0
6	0—>76—>41—>54—>21—>0
7	0—>70—>3—>96—>97—>62—>0
8	0—>1—>81—>85—>49—>0
9	0—>56—>2—>4—>22—>6—>7—>0
10	0—>24—>30—>32—>33—>29—>0
11	0—>61—>60—>59—>69—>0
12	0—>37—>45—>39—>52—>40—>51—>50—>0
13	0—>12—>14—>8—>9—>74—>0
14	0—>88—>83—>82—>0
15	0—>68—>77—>78—>79—>80—>0
16	0—>20—>19—>13—>0
17	0—>72—>64—>71—>63—>67—>57—>58—>0
18	0—>73—>75—>65—>15—>11—>0
19	0—>36—>42—>38—>0
20	0—>48—>47—>46—>44—>43—>55—>0

图5是GA、SA和GA-SA收敛对比图，GA-SA算法开始收敛的平均迭代次数比GA算法和SA算法分别少118.4和117.5次。即GA-SA比GA和SA收敛速度快、效果好。

4.3.2　应用结果分析

图6和图7的试验结果横坐标的取值是取10次实验结果的平均值，分别是GA、SA和GA-SA在相同试验条件下车辆行驶总路程和总成本的比较。

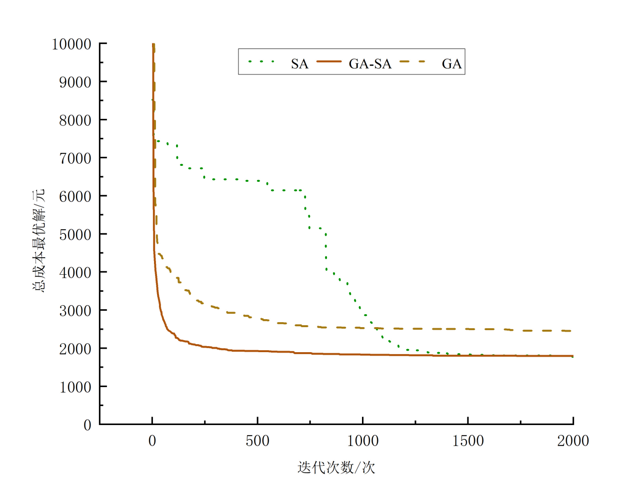


图4 GA、SA、GA-SA最优解进化过程示意图

Fig. 4 Schematic diagram of optimal solution evolution process of genetic algorithm, simulated annealing algorithm and genetic simulated annealing algorithm

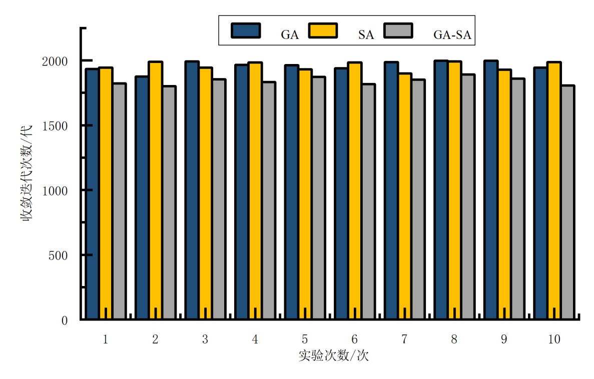


图5 GA、SA、GA-SA收敛对比图

Fig.5 Convergence comparison diagram of genetic algorithm, simulated annealing algorithm and genetic simulated annealing algorithm

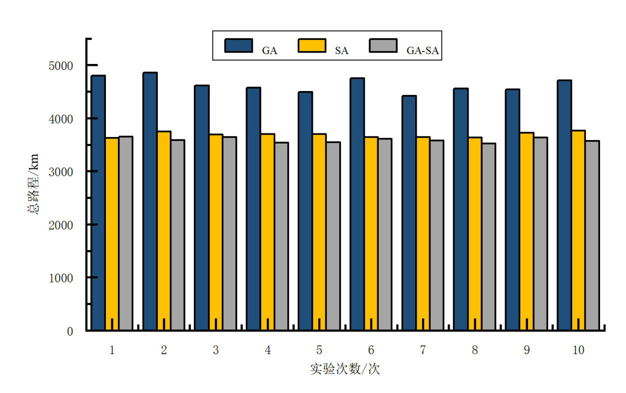


图6 车辆行驶总路程对比图

Fig. 6 Comparison chart of total vehicle distances

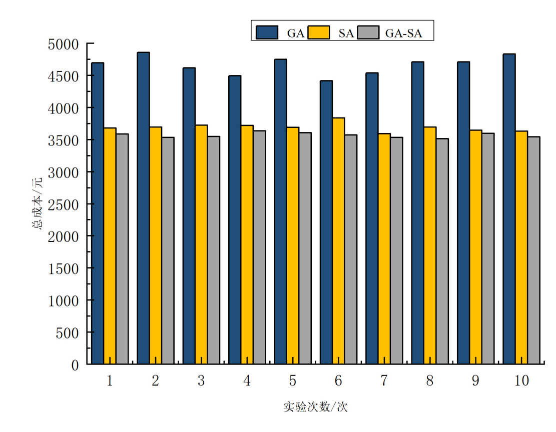


图7 车辆行驶运输总成本对比图

Fig. 7 Comparison chart of total vehicle transportation costs

由图6可以看出，GA-SA配送行驶平均总路程比GA和SA分别减少22.6%（1044.64 km）和3%（100.01 km）。在这次试验结果中，GA-SA总路程最大值为3649.47 km，最小值为3520.16 km，两者相差129.31 km，最高值与最低值相差较少，证明试验过程优化平稳。有差值是因为GA具有随机性，另外多目标优化要考虑多个目标之间的权衡，很可能是为了使车辆数降低，而使总成本的值变大。GA总路程最高值达到4859.37 km，最小值达到4417.9 km，两者相差441.7 km，差值较大，因为传统的GA容易过早收敛。从而陷入局部最优解无法跳出。SA算法总路程最高值达到3765.96 km，最低值达到3624.29 km，两者相差141.64 km。总路程无论是最大数值，最小数值，还是相差数值，本研究算法的试验结果均小于传统的GA和SA算法。

蔬菜配送成本包括人工成本、机器损耗、油损耗等。经过当地调研，综合考虑设定每公里消耗成本为0.5元，即：

$$总成本=总里程\times 0.5 \qquad (12)$$

可知总成本和总路程是正比关系，有着相同的变化的趋势。由图7可以得出GA-SA算法的配送平均总成本比GA算法和SA算法分别减少23.7%（553.1元）和4%（62.26元）。无论是从最大数值、最小数值，还是相差数值，GA-SA总成本的试验结果也都小于传统的GA和SA算法。

5 结 论

本研究对叶类和茄果类蔬菜、菌类蔬菜、根茎类和瓜果类蔬菜三类蔬菜设置三个不同的硬时间窗，一类蔬菜的时间窗为0~4 h、二类蔬菜的时间窗为0~6 h、三类蔬菜的时间窗为0~10 h，对蔬菜运输总成本、运输耗费时间、运输使用车辆进行多目标优化，构建蔬菜运输配送路径优化模型，并对GA进行改进为GA-SA，求得蔬菜运输最优路径，得到结论如下。

（1）本研究算法有更快的收敛速度，比GA和SA分别减少118.4和117.5次，更短的迭代时间。

（2）GA-SA算法有效降低了蔬菜运输总路程，同时在蔬菜保鲜时间内减少了运输时间，降低了蔬菜新鲜度的损耗。

（3）本研究算法有效降低了行驶总成本。

参考文献：

[1] 董波. 盐城市亭湖区大棚蔬菜有机肥施用研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2019.
DONG B. Application of biofertilizer in greenhouse vegetable growth in Tinghu district, Yancheng city[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2019.

[2] SHI Y, ZHOU Y, YE W, et al. A relative robust optimization for a vehicle routing problem with time-window and synchronized visits considering greenhouse gas emissions[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 275: ID 124112.

[3] WANG X, WASIL E. On the road to better routes: Five decades of published research on the vehicle routing problem[J]. Networks, 2021, 77(1): 66-87.

[4] ASGHAR A, HOSSEINABADI R, SLOWIK A, et al. An ameliorative hybrid algorithm for solving the capacitated vehicle routing problem[J]. IEEE Access, 2019, 7(4): 175454-175465.

[5] RIVERA J C, AFSAR H M, PRINS C. A multistart iterated local search for the multitrip cumulative capacitated vehicle routing problem[J]. Computational Optimization and Applications, 2015, 61(1): 159-187.

[6] 周洋, 陆轶. A蔬菜运输公司物流配送路径优化研究[J]. 现代商贸工业, 2016, 37(24): 49-50.
ZHOU Y, LU Y. Research on logistics distribution route optimization of a vegetable transportation company[J]. Modern Commerce and Industry, 2016, 37 (24): 49-50.

[7] 陶涛, 朱家明. 基于Floyd算法对蔬菜运输的研究[J]. 赤峰学院学报(自然科学版), 2018, 34(7): 13-15.
TAO T, ZHU J. Research on vegetable transportation based on Floyd algorithm[J]. Journal of Chifeng University (Natural Science Edition), 2018, 34 (7): 13-15.

[8] 苏贝贝. 应急物资配送选址—路径规划干扰管理模型研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2020.
SU B. Research on disruption management model of location-routing problem in emergency material distribution [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2020.

[9] MENDES S, LUSH V, WANNER E F, et al. Online clustering reduction based on parametric and non-parametric correlation for a many-objective vehicle routing problem with demand responsive transport[J]. Expert Systems with Applications, 2020, 170: ID 114467.

[10] LESPAY H, SUCHAN K. A case study of consistent vehicle routing problem with time windows[J]. International Transactions in Operational Research, 2021, 28 (3): 1135-1163.

[11] MOLINA J C, SALMERON J L, EGUIA I. An ACS-based memetic algorithm for the heterogeneous vehicle routing problem with time windows[J]. Expert Systems With Applications, 2020, 157: ID 113379.

[12] 赵邦磊. 基于改进多目标蚁群算法的冷链物流路径优化研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2020.
ZHAO B. Cold chain logistics path optimization via improve multi-objective ant colony algorithm[D]. Huainan: Anhui University of Technology, 2020.

[13] JEA B, AS A. Hybrid genetic-sweep algorithm to solve the vehicle routing problem with drones[J]. Physical Communication, 2021, 44: ID 101236.

[14] 杜芋颖. 基于启发式算法的物流配送路径设计与实现[D]. 南京: 南京邮电大学, 2020.
DU Y. Design and implementation of logistics distribution path based on heuristic algorithm[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2020.

[15] 尹秋霜. 考虑越库作业的连锁超市配送路径优化研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2019.
YIN Q. Research on optimization of distribution path of chain supermarkets considering cross-docking operations[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2019.

[16] 杨爱芳. 外卖配送路径优化研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.
YANG A. Research on optimization of takeaway distribution route[D]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2020.

[17] 李军涛, 刘明月, 刘朋飞. 生鲜农产品多车型冷链物

流车辆路径优化[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(7): 115-123.
LI J, LIU M, LIU P. Route optimization of multi-vehicle cold chain logistics for fresh agricultural products[J]. Journal of China Agricultural University, 2021, 26(7): 115-123.
[18] 范利阳. 基于改进遗传算法的多能源车辆路径问题研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2020.
FAN L. Multi-energy vehicle routing problem based on improved genetic algorithms[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020.
[19] 余梅. 基于蚁群-遗传融合改进算法的物流车辆路径优化[D]. 南充: 西华师范大学, 2020.
YU M. Optimization of logistics vehicle path based on ant colony-genetic fusion algorithm[D]. Nanchong: West China Normal University, 2020.
[20] 徐卓. 考虑模糊时间窗的生鲜产品多目标配送路径优化研究[D]. 广州: 暨南大学, 2019.
XU Z. Research on multi-objective distribution path optimization of fresh products considering fuzzy time window[D]. Guangzhou: Jinan University, 2019.
[21] 裴玉青. 面向智慧医药的物流配送路径优化研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2020.
PEI Y. Research on logistics distribution path optimization for intelligent medicine[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2020.
[22] ZHANG K, HE F, ZHANG Z, et al. Multi-vehicle routing problems with soft time windows: A multi-agent reinforcement learning approach[J]. Transportation Research Part C, 2020, 121: ID 102861.
[23] 范厚明, 刘文琪, 徐振林, 等. 混合粒子群算法求解带软时间窗的VRPSPD问题[J]. 计算机工程与应用, 2018, 54(19): 221-229.
FAN H, LIU W, XU Z, et al. Hybrid particle swarm optimization for solving VRPSPD problems with soft time windows[J]. Computer Engineering and Application, 2018, 54(19): 221-229.
[24] 鄢栋, 陈家琪. ICP策略下带软时间窗的动态车辆路径优化问题研究[J]. 软件导刊, 2018, 17(3): 172-175.
YAN D, CHEN J. The dynamic vehicle routing optimization problem with soft time windows based on ICP strategy[J]. Software Guide, 2018, 17 (3): 172-175.
[25] 李红. 基于改进遗传算法的便利店配送中心选址路径优化研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
LI H. Research on location and path optimization of convenience store distribution center based on improved genetic algorithm[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.
[26] 张丽, 郭夕英, 史立君. 物联网在设施蔬菜大棚种植上的有效应用[J]. 农业工程技术, 2021, 41(9): 67-68.
ZHANG L, GUO X, SHI L. Effective application of Internet of things in greenhouse planting of protected vegetables[J]. Agricultural Engineering Technology, 2021, 41 (9): 67-68.
[27] WU L, WANG S, GILBERT L. The robust bulk ship routing problem with batched cargo selection[J]. Transportation Research Part B, 2021, 143(1): 124-159.
[28] TOTH P, VIGO D. The vehicle routing problem(车辆路径问题)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.
[29] 吴亮然, 林剑, 刘毅志, 等. 基于车辆配送线路的区域协同配送方法[J]. 计算机工程与应用, 2020, 56(1): 244-250.
WU L, LIN J, LIU Y, et al. Regional collaborative distribution method based on vehicle distribution line[J]. Computer Engineering and Application, 2020, 56 (1): 244-250.
[30] GÓMEZ M R A, CANO J A, CORTÉS P, et al. A discrete particle swarm optimization to solve the put-away routing problem in distribution centres[J]. Computation, 2020, 8(4): 1-17.
[31] 郄东翔, 狄政敏, 张建峰, 等. 河北省塑料大棚蔬菜生产现状及建议[J]. 中国瓜菜, 2020, 33(6): 63-66.
JIA D, DI Z, ZHANG J, et al. Current situation and suggestions of vegetable production in plastic greenhouse in Hebei Province[J]. Chinese Melons and Vegetables, 2020, 33(6): 63-66.

Multi-Objective Vegetable Transportation and Distribution Path Optimization with Time Windows

WANG Fang[1], TENG Guifa[1,2*], YAO Jingfa[3]

(1. *School of Information Science and Technology*, *Hebei Agricultural University*, *Baoding* 071001, *China;* 2. *Hebei Key Laboratory of Agricultural Big Data*, *Baoding* 071001, *China;*3. *Hebei Software Institute*, *Baoding* 071030, *China*)

Abstract: There are higher requirements for the timeliness of vegetable transportation and distribution. In order to solve the prob-

lems of long transportation time, high total transportation cost and short preservation time of vegetables during transportation, considering the constraints such as vehicle load and time window, this study proposed a genetic simulated annealing algorithm (GA-SA) for multi-objective vegetable distribution path optimization with time windows. That was, the simulated annealing algorithm (SA) adaptive (Metropolis) acceptance criterion was introduced into the operation process of genetic algorithm (GA). The basic idea was: First, the original population was selected, crossed and mutated by genetic algorithm to form a new generation of path population. At this time, by introducing metropolis acceptance criterion, and then, after modifying the sub situation of the new generation path population and selecting cross mutation, a new target path population was obtained. The improved algorithm retained the excellent individual, and the convergence speed, jumped out of the local optimal solution found based on genetic algorithm, and then found the global optimal solution. Then, the multi-objective of returning all vehicles to the distribution center after distribution was the least time-consuming, the lowest cost and the least use of vehicles was achieved, and the optimal path of vegetable transportation was obtained. Taking Baoding city in Hebei province as the distribution center and some towns under the jurisdiction of Baoding city as the distribution points, the experiment of vegetable transportation path optimization was designed. The experiments of genetic algorithm, simulated annealing algorithm and genetic simulated annealing algorithm were carried out, respectively. The comparative analysis was carried out from the aspects of convergence speed, total distance, total time, vehicles and total cost. The experimental results showed that, compared with the genetic algorithm and simulated annealing algorithm, GA-SA could effectively accelerate its convergence speed. The total cost of the optimized distribution route reduced by about 23.7% and 4% respectively, the total distance reduced by 22.6% and 3% respectively, the time consumption reduced by 26.2 and 2.6 hours respectively, and 2 and 1 vehicles were used less respectively. This study could also provide reference for the research of cold fresh food and other transportation path optimization.

Key words: genetic algorithm; Metropolis guidelines; vehicle routing problem; vegetable transportation; simulated annealing algorithm; time consuming; cost; path optimization

附表：地点编码表

编码	地点	编码	地点	编码	地点	编码	地点	编码	地点	编码	地点	编码	地点
0	保定市	14	东史端乡	28	腰山镇	42	长古城乡	56	涞水县	70	北王力乡	84	龙泉关镇
1	定州市	15	留村乡	29	蒲上乡	43	都亭乡	57	清苑县	71	东吕乡	85	平阳镇
2	涿州市	16	正村乡	30	白云乡	44	南店头乡	58	清苑镇	72	何桥乡	86	城南庄镇
3	安国市	17	瀑河乡	31	河口乡	45	北店头乡	59	冉庄镇	73	孙村乡	87	东下关乡
4	高碑店市	18	户木乡	32	安阳乡	46	罗庄乡	60	阳城镇	74	阎庄乡	88	王林口乡
5	易县	19	东釜山乡	33	台鱼乡	47	雹水乡	61	魏村镇	75	望亭乡	89	台峪乡
6	徐水县	20	义联庄乡	34	唐县	48	大洋乡	62	温仁镇	76	满城县	90	大台乡
7	安肃镇	21	源县	35	仁厚镇	49	迷城乡	63	张登镇	77	高阳县	91	史家寨乡
8	崔庄镇	22	定兴县	36	王京镇	50	齐家佐乡	64	大庄镇	78	安新县	92	砂窝乡
9	大因镇	23	顺平县	37	高昌镇	51	羊角乡	65	臧村镇	79	雄县	93	吴王口乡
10	遂城镇	24	蒲阳镇	38	北罗镇	52	石门乡	66	白团乡	80	容城县	94	下庄乡
11	漕河镇	25	大悲乡	39	白合镇	53	黄石口乡	67	北店乡	81	曲阳县	95	北果元乡
12	高林村镇	26	神南乡	40	军城镇	54	倒马关乡	68	石桥乡	82	阜平县	96	博野县
13	大王店镇	27	高于铺镇	41	川里镇	55	望都县	69	李庄乡	83	阜平镇	97	蠡县